



強磁性金属薄膜における電界による磁化制御に関する研究

著者	金井 駿
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第15814号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58579

氏 名 かないしゅん 金井 駿
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目 強磁性金属薄膜における電界による磁化制御に関する研究
指 導 教 員 東北大学教授 大野 英男
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 白井 正文 東北大学教授 佐橋 政司
東北大学教授 松倉 文礼

論文内容要約

3d 遷移金属と絶縁体界面、特に CoFeB/MgO 接合界面には 1 mJ/m^2 を超える垂直磁気異方性が報告されており、この構造を磁性層/絶縁層/磁性層の三層構造から成る磁気トンネル接合(MTJ)の基幹として用いた場合、高積性・高熱安定性・低消費電力といった高性能不揮発性メモリ・デバイスに要求される性能を同時に満たすことが実証されている。また、磁気特性の電界制御による磁化反転法は、半導体メモリと同程度の電力での動作が可能であり、近年大きな注目を集めている。本論文は、CoFeB/MgO 積層構造における垂直磁気異方性の物理的源の実験的解明、CoFeB/MgO 磁気トンネル接合での電界による磁気異方性の変調効果の評価手法の確立及び電界誘起磁化反転の実証を行った研究をまとめたものである。以下に要約を示す。

第1章 既存の揮発性メモリ及び不揮発性メモリの研究状況について、特に新規超低消費電力デバイスの開発状況とその意義をまとめた。

第2章 磁性金属薄膜の垂直磁気異方性とそのデバイス応用上の重要性、薄膜の磁気特性の電気的操作手法をまとめた。

第3章 異なる膜厚の $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ を持つ、Ta/CoFeB/MgO 接合の電子状態を X 線磁気円二色性(XMCD)により測定した結果についてまとめた。X 線の吸収量のエネルギー・スペクトルを複数の磁化角度について測定し、元素別の軌道磁気モーメントの異方性を評価した。軌道磁気モーメントの異方性の大きさは磁気異方性の大きさに比例するため、測定により元素別の磁気異方性エネルギーを決定することができる。測定の結果、Co より Fe の方が軌道磁気モーメントの異方性が大きいこと、薄膜ほど軌道磁気モーメントの異方性が大きくなることを示した。この結果から、CoFeB/MgO 界面での Fe 原子の磁気異方性が垂直磁気異方性の起源として支配的であることを実験的に明らかにした。また第一原理計算との比較を行い、実験から得られた元素毎の磁気異方性の大小の傾向は計算結果と定性的に一致することを明らかにした。XMCD から得られた磁気異方性の膜厚依存性は磁化測定の結果と定性的に一致する。しかし、軌道磁気モーメントの膜厚依存性から分離することで得られた界面・バルクの磁気異方性は磁化測定の結果より約1桁大きく、定量的には一致していない。膜厚を変えたより多くの試料で、XMCD スペクトルの磁界印加角度性を詳細に調べることで、更に測定精度を高める必要がある。

スパッタリング法により成膜した Ta/CoFe (1.2 nm)/MgO 接合を電極とした電界効果デバイスを作製し、電界印加により磁気異方性を变化させた際の電子状態を XMCD により測定した。得られたスペクトル形状から、Fe 及び Co の化学結合状態は電界印加により殆ど変化しないことが分かった。ここでの結果は、これ迄に報告されている分子線エピタキシ(MBE)法により成膜した Au/FeCo(0.5 nm)/MgO 接合での電界印加による Fe の化学結合状態の変化の観測とは異なった傾向を示した。このことは成膜方法または膜厚により電界効果の起源が異なる可能性を示している。

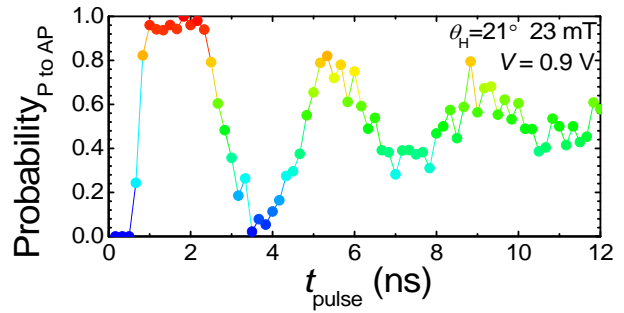
第4章 強磁性共鳴法を用いて MTJ 中の磁気特性の電界変調の定量的評価手法の確立を目的として行った実験をまとめた。サファイア基板上に Ta/Ru/Ta/Co₂₀Fe₆₀B₂₀/MgO/CoFeB/Ta/Ru スタックをスパッタリング法により成膜後、電子線リソグラフィとイオン・ミリングによりコプレーナ導波路に接続した直径40 nmのMTJを作製した。電圧印加により自由層の保磁力が変化することから、明瞭な磁気特性の電界効果を観測した。MTJに高周波電圧を印加することにより、磁気特性の電界変調効果を介した強磁性共鳴(FMR)を誘起し、反射波の直流成分を検出した。周波数掃引の FMR スペクトルは、FMR が電圧による磁気異方性変調または電圧によるフィールド・ライク・トルクの変調により誘起されていることを示す、反対称型のローレンツ関数型であり、自由層の向きにより信号の符号が変わることから、主に電界効果により FMR が誘起されていることを示した。垂直磁化容易の参照層及び自由層を持つ MTJ に面内磁界を印加し、電界誘起 FMR のホモダイナミック・スペクトルを測定した。共鳴周波数の外部磁界依存性は CoFeB/MgO 接合での磁化の方向余弦の2次及び4次の磁気異方性を考慮したランダウ・リフシッツ・ギルバート(LLG)方程式を用いて説明することができる。入力高周波電圧に直流バイアス電圧を重ねさせて行った FMR スペクトル測定により MTJ 中での磁気異方性の電界変調量を決定し、2次の磁気異方性が界面磁気異方性を反映していることを明らかにした。スペクトルの半値幅とピーク形状のバイアス電圧依存性は MTJ 自由層に働くスピン・トルクにより説明できる。本実験結果は、電界誘起 FMR とそのホモダイナミック検波が、ナノ・スケールのスピントロニクス・デバイスの磁気特性、特に MTJ や電界誘起磁化反転デバイス、スピン注入磁化反転デバイスの性能に直結する磁気異方性やスピン・トルク、及びダンピングについての定量的評価手法として有用であることを示した。

第5章 電界誘起磁化反転の実現を目的として行った実験と、その実用に向けた問題点の解決指針をまとめた。上述の方法と同様の手法により、コプレーナ導波路に接続した垂直磁化容易 MTJ を作製し、ナノ秒程度の継続時間を持つ電界パルスの印加により磁気異方性を一時的に制御し、磁化容易軸方向を膜面平行方向にすることにより磁化歳差運動を制御する磁化反転方式—電界誘起磁化反転方式—を実証した。電界誘起磁化反転は、膜面垂直方向の外部磁界により参照層からの漏れ磁界を打ち消した際に制御性よく引き起こすことが可能であり、外部磁界にはミリ・テスラ程度の精度が必要であることが分かった。同一極性パルスの電圧印加により磁化平行配置から反平行配置、及び反平行配置から平行配置に反転させることが可能である。パルス長に対する磁化反転確率は明瞭な振動的振る舞いを示し(図)、磁化反転は磁化歳差運動を介して起こることを裏付けている。歳差運動周期

は外部磁界の面内成分と電界印加時の異方性磁界の大きさにより説明することができる。印加外部磁界の膜面平行成分強度の制御により反転時間が制御可能である。しかし、外部磁界の膜面平行成分が小さくても、大きくても磁化反転確率は減少する傾向を示す。LLG 方程式を用いて単磁区を仮定したマイクロ・スピン・シミュレーションを行った結果から、磁化の歳差運動時の熱擾乱が磁化反転確率を減少させる原因であることを示した。これは外部磁界の膜面平行成分が小さいときには反転時間が長くなることにより、また大きいときには歳差運動角の減少により、熱擾乱の影響を受けるためと考えられる。マイクロ・マグネティック・シミュレーションにより、デバイス構造に起因する有効磁界の面内分布が熱擾乱の影響を増強する一因となっている可能性も示した。

電界パルスの印加により誘起された磁化歳差中の MTJ の透過電圧の実時間測定を行い、電界誘起磁化ダイナミクスの一試行に対する実時間測定を行った。電界誘起磁化反転は歳差運動により誘起されることを示す透過電圧の時間に対する明瞭な振動が観測された。磁化歳差振幅の明瞭な減衰は見られないが、歳差の位相が時間とともにずれるため、複数回の測定結果を平均した際には急速に振動振幅が減少するように見えることを明らかにした。単一試行での振動の減衰はギルバート・ダンピング定数が 10^{-2} のオーダーであることを示し、これはブランケット膜での FMR 測定から得られた値と一致する。用いた電界効果デバイスにおいて磁化反転時に必要なエネルギーはキャパシタに電荷を蓄積させるためのサブ・フェムト・ジュールであるが、実際にはデバイスに電流が流れており、そのジュール熱の大きさはサブ・ピコ・ジュールである。単位面積当たりのデバイス抵抗を大きくすることによりこれらの大小関係を逆転することができ、絶縁膜膜厚を 3 ナノ・メートルにすることにより、0.1 フェムト・ジュール程度での磁化反転が可能であることが期待される。デバイスの磁化反転エネルギーと熱エネルギーの比である熱安定性は 30 から 35 であるが、 10^9 ビットを 10 年間保持するためには 60 程度が必要である。デバイス体積を減少させることにより熱安定性も減少するため、電界による磁気異方性変調効率の大きい磁性体や、より大きな電界を印加することができる絶縁膜の組み合わせを用いて改善する必要がある。

印加する電界パルスの振幅により、磁化反転モードが電界誘起磁化反転とスピン注入磁化反転で切り替わるデバイスを作製し、電界誘起磁化反転を引き起こしたのち、スピン・トルクによる磁化のダンピングの増大を引き起こす、新しい磁化反転方式を実証した。この磁化反転方式においては、磁化反転速度、消費電力がスピン注入磁化反転単一方式による磁化反転よりも優れている。また、電界パルス継続時間に許容される時間的誤差が電界誘起磁化反転単一方式の場合よりも向上するため、電界誘起磁化反転の段階的実用化の 1 ステップとして有用な可能性を示した。



図：電界誘起磁化反転の磁化反転確率の印加パルス長さ依存性。明瞭な振動的振る舞いが観測される。

第6章 本論文の結論である。